УДК 61:004.45

В.П. Марценюк, Р.О. Сарабун
Тернопільський державний медичний університет імені І.Я. Горбачевського
Україна, 46001, м. Тернопіль, майдан Волі, 1

Програмне середовище моделювання рівня артеріального тиску

V. Marceniuk, R. Sarabun
I. Horbachevsky Ternopil State Medical University
Ukraine, 46001, c. Ternopil, m. Voli, 1

Software Environment for Modeling the Level of Blood Pressure

В.П. Марценюк, Р.О. Сарабун
Тернопольский государственный медицинский университет имени И.Я. Горбачевского
Украина, 46001, г. Тернополь, площадь Воли, 1

Программная среда моделирования уровня артериального давления

У даній роботі розглянуто модель серцево-судинної системи Фовлера-МакГюйнеса, яка враховує дію барорефлексної системи керування артеріальним тиском. Запропоновано веб-інтегроване програмне середовище для моделювання рівня артеріального тиску, до складу якого входить бібліотека Java-класів.
Ключові слова: артеріальний тиск, барорефлексна система, барорецептори.

The model of the cardiovascular system of A.C. Fowler and M.J. McGuinness which takes into consideration the action of baroreflex control system of blood pressure is discussed in this work. The web-integrated software environment for modeling the level of blood pressure which includes the Java Class Library is offered.
Key words: blood pressure, baroreflex system, baroreceptors.

В данной работе рассмотрена модель сердечно-сосудистой системы Фовлера-МакГюйнеса, которая учитывает действие барорефлексной системы управления артериальным давлением. Предложено веб-интегрированая программная среда моделирования уровня артериального давления, в составе которой есть библиотека Java-классов.
Ключевые слова: артериальное давление, барорефлексная система, барорецепторы.

Вступ

Артеріальний тиск – це сила тиску крові на стінку артерій під час систоли та діастоли серцевого м’язу. Контроль артеріального тиску має вирішальне значення для здоров’я людини. Порушення рівня артеріального тиску викликає підвищення ризику виникнення інфаркту міокарда, інсульту, ниркової недостатності. Тому важливим є питання проведення моделювання процесів керування серцево-судинною системою, зокрема моделювання системи керування рівнем артеріального тиску. Проблеми моделювання артеріального тиску розглянуто в роботах [1], [2]. Та все ж невирішеною залишається проблема запізнення з яким проходить сигнал по пара-

симпатичній системі, яка може бути вирішена за рахунок введення в систему величини запізнення в часі парасимпатичної системи τ. Зокрема в роботах [3], [4] з цією метою використано апарат диференціальних рівнянь із запізненням.

Мета даної роботи – розглянути модель серцево-судинної системи Фовлера-МакГюйнеса, яка враховує величину запізнення в часі парасимпатичної системи τ; розробити програмне забезпечення, яке реалізує дану модель у вигляді Інтернет-проекту.

Модель Фовлера-МакГюйнеса серцево-судинної системи із запізненням в часі

Метою авторів роботи [3] було наступне: розробити модель керування серцево-судинною системою, яка б дозволяла досить просто проводити математичний аналіз і одночасно, наскільки це можливо, точно відображала фізіологічні процеси. В роботі для моделювання запропоновано систему диференціальних рівнянь із запізненням.

Модель Фовлера-МакГюйнеса описує систему кровообігу, включаючи велике коло кровообігу і нехтуючи малим. Таке спрощення дозволяє уникнути додаткового диференціального рівняння для опису тиску в легеневій вені. Припускається, що кровоносна система є замкнутою і обсяг крові в ній є незмінний, артерії і вени діють як сполучені судини так, що зміна об'єму крові пропорційна зміні тиску, а капілярна система залежить від перепаду тиску в системі. До цієї механічної системи додано барорефлексну систему керування (рис. 1). Барорецептори визначають артеріальний тиск і посилають сигнали мозку, який у відповідь посилає швидкі (парасимпатичні) і повільні (симпатичні) сигнали назад у серце, змінюючи частоту серцевих скорочень, та до артеріол і капілярів, що призводить до зміни периферичного опору.

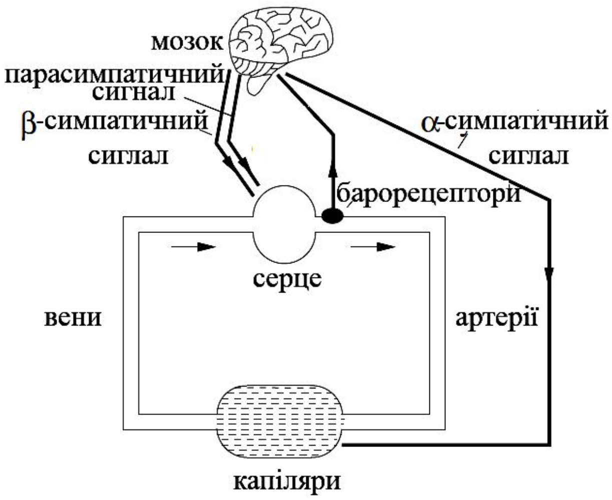


Рисунок 1 – Барорефлексна система керування артеріальним тиском

Модель Фовлера-МакГюйнеса по суті є продовженням моделі, введеної Оттесеном у роботі [4], до якої додано внутрішньо контрольовану частоту серцевих скорочень і барорефлексну систему керування периферичного опору. При відсутності зворотного зв'язку від центральної нервової системи, серце, як відомо, продовжує битися завдяки імпульсам, які генерує синусовий вузол. Дана модель також враховує цю поведінку серця.

Модель ґрунтується на системі нелінійних диференціальних рівнянь із запізненням (1):

$$
\begin{aligned}
&C_a \frac{dp_a}{dt} = -\frac{(p_a - p_v)}{R_c} + H\Delta V \\
&C_v \frac{dp_v}{dt} = \frac{(p_a - p_v)}{R_c} - \frac{p_v}{R_v} \\
&\frac{dH}{dt} = \frac{\beta_H T_S}{1+\gamma T_p} - V_H T_p + \delta_H (H_0 - H)
\end{aligned}
, \qquad (1)
$$

де $R_c = R_C^0(1+\alpha T_S)$ – периферичний опір артеріальної системи, H – частота серцевих скорочень, p_a – середній артеріальний тиск, p_a' – швидкість зміни артеріального тиску, p_v – середній венозний тиск, C_a – артеріальний комплаєнс, C_v – венозний комплаєнс, R_v – периферичний опір венозної системи, ΔV – ударний об’єм (обсяг відкачуваної крові за одне серцеве скорочення), β_H – сила симпатичного тону $T_S = g(p_a(t-\tau))$, V_H – сила парасимпатичного тону $T_p = 1 - g(p_a(t))$, γ – є мірою загасання дії блукаючого нерва на тонус симпатичної нервової системи, τ – запізнення симпатичної системи, $g(p) = 1/(1+p^n)$ – функція Хілла.

Значення параметрів системи нелінійних диференціальних рівнянь подано в табл. 1.

Таблиця 1 – Значення параметрів системи нелінійних диференціальних рівнянь

Параметр	Назва параметру	Значення
C_a	артеріальний комплаєнс	1,55 мл·мм рт.ст.$^{-1}$
C_v	венозний комплаєнс	50 мл·мм рт.ст.$^{-1}$
R_C^0	мінімальний опір артеріальної системи	0,6 мм рт.ст. ·с·мл$^{-1}$
R_v	периферичний опір венозної системи	0,016 мм рт.ст. ·с·мл$^{-1}$
ΔV	ударний об’єм	50 мл
H_0	неконтрольований серцевий ритм	100 хв$^{-1}$
τ	запізнення симпатичної системи	3 с
V_H	сила парасимпатичного тону	1,17 с$^{-2}$
β_H	сила симпатичного тону	0,84 с$^{-2}$
α	сила ефекту симпатичної нервової системи	1,3
γ	міра загасання	0,2
δ_H	час розслаблення	1,7 с$^{-1}$

Програмна реалізація моделі Фовлера-МакГюйнеса

Програмне середовище, запропоноване в даній роботі, реалізоване у вигляді пакету Java-класів. До нього входять наступні пакети і класи.

Пакет fde призначений для отримання чисельного розв’язку диференціальних рівнянь. Пакет graph містить класи, призначені для графічної візуалізації розв’язків рівнянь. У пакеті fowler містяться класи з описом моделі Фовлера-МакГюйнеса. Сюди входять класи:

– fowlerSystem – описує праві частини диференціальних рівнянь моделі;

– fowlerSystemGraph – використовується для побудови графіків розв’язків відповідних рівнянь;

– fowlerSystemGraph Menu – клас, який описує меню побудови графіків;

– fowlerSystemInputDataFrame – клас-фрейм для введення початкових параметрів моделі.

На рис. 2 показано вікно введення параметрів моделі Фовлера-МакГюйнеса.

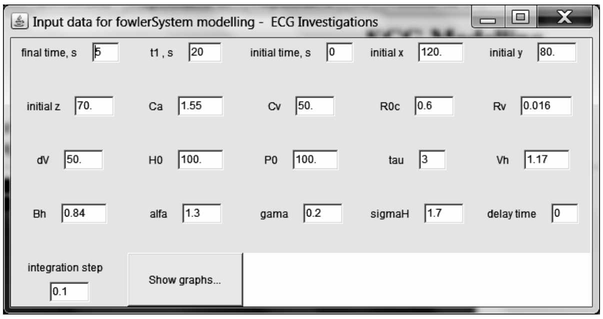


Рисунок 2 – Вікно введення параметрів моделі Фовлера-МакГюйнеса

Вплив ударного об'єму серця ΔV на рівень тиску

Ударним об'ємом серця називають об'єм крові, який лівий шлуночок викидає в аорту, а правий – в легеневий стовбур за одне скорочення. У нормі в людини він дорівнює 50 – 70 мл.

На основі розробленого програмного забезпечення проведено дослідження впливу ударного об'єму серця ΔV на рівень тиску. На рис. 3, 4, 5 виведено графічні зображення розв'язків моделі Фовлера-МакГюйнеса при різних значеннях ударного об'єму серця.

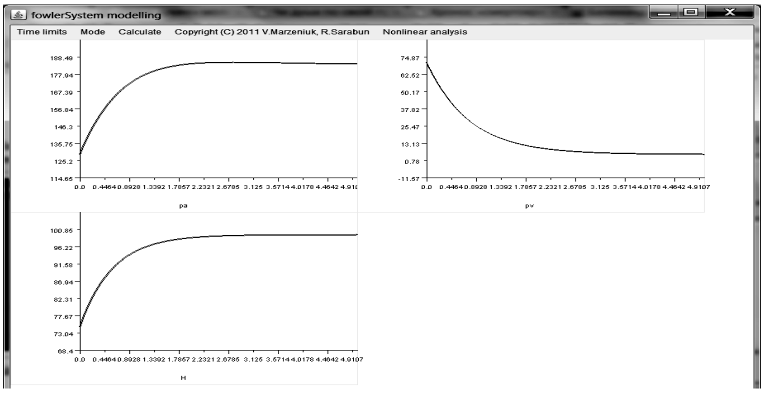


Рисунок 3 – Графічні зображення розв'язків моделі Фовлера-МакГюйнеса при ударному об'ємі $\Delta V = 50$

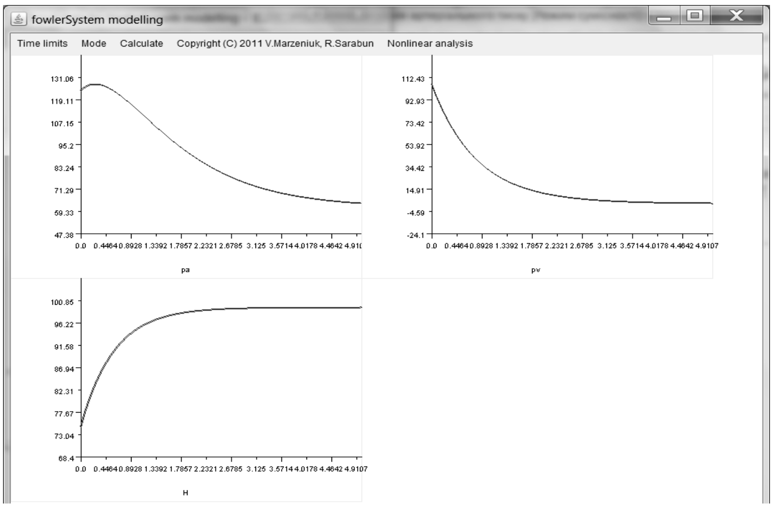


Рисунок 4 – Графічні зображення розв'язків моделі Фовлера-МакГюйнеса при ударному об'ємі $\Delta V = 40$

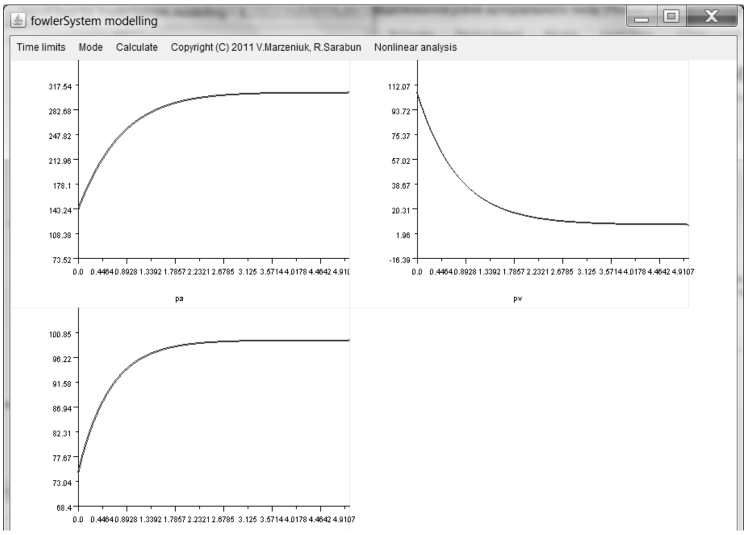


Рисунок 5 – Графічні зображення розв’язків моделі Фовлера-МакГюйнеса при ударному об’ємі $\Delta V = 80$

Бачимо, що при зменшенні ударного об’єму (рис. 4) рівень артеріального тиску різко зменшується , а при збільшенні (рис. 5) зростає і досягає рівня, який перевищує фізіологічно можливий для людини.

Висновок

У роботі розглянуто модель серцево-судинної системи Фовлера-МакГюйнеса, для якої розроблено програмне середовище у вигляді бібліотеки Java-класів, що забезпечує можливість його публікації у вигляді Інтернет-проекту.

Література

1. Abbiw-Jackson R.M. Gain-induced oscillations in blood pressure / R.M. Abbiw-Jackson, W.F. Langford // J. Math. Biol. – 1998. – № 37. – P. 203-234.
2. Ringwood J.V. Slow oscillations in blood pressure via a nonlinear feedback model / J.V. Ringwood, S.C. Malpas // Am. J. Physiol. Regulatory Integrative Comp. Physiol. – 2001. – № 280. – R. 1105-1115.
3. Fowler A.C. A Delay Recruitment Model of the Cardiovascular Control System / A.C. Fowler, M.J. McGuinness // The Journal of Mathematical Biology. – 2005. – № 5.
4. Ottesen J.T. Modelling of the baroreflex-feedback mechanism with time-delay / J.T. Ottesen // J. Math. Biol. – 1997. – № 36. – P. 41-63.
5. McSharry P.E. A dynamical model for generating synthetic electrocardiogram signals / P.E. McSharry G. Clifford, L. Tarassenko [et all.] // IEEE Transaction On biomedical Engineering. – 2003. – № 50 (3). – P. 289-294.
6. Марценюк В.П. Програмне середовище фармако-кінетичних системних досліджень / В.П. Марценюк, І.Є. Андрущак // Искусственный интеллект. – 2009. – № 3. – С. 126-131.

Literatura

1. Abbiw-Jackson R.M. Gain-induced oscillations in blood pressure / R.M. Abbiw-Jackson, W.F. Langford // J. Math. Biol. – 1998. – № 37. – P. 203-234.
2. Ringwood J.V. Slow oscillations in blood pressure via a nonlinear feedback model / J.V. Ringwood, S.C. Malpas // Am. J. Physiol. Regulatory Integrative Comp. Physiol. – 2001. – № 280. – R. 1105-1115.
3. Fowler A.C. A Delay Recruitment Model of the Cardiovascular Control System / A.C. Fowler, M.J. McGuinness // The Journal of Mathematical Biology. – 2005. – № 5.

4. Ottesen J.T. Modelling of the baroreflex-feedback mechanism with time-delay / J.T. Ottesen // J. Math. Biol. – 1997. – № 36. – P. 41-63.
5. McSharry P.E. A dynamical model for generating synthetic electrocardiogram signals / P.E. McSharry G. Clifford, L. Tarassenko [et all.] // IEEE Transaction On biomedical Engineering. – 2003. – № 50 (3). – P. 289-294.
6. Martsenyuk V.P. Software Environment for Pharmacokinetic System Research / V.P. Martsenyuk, I.Ye. Andrushchak // II. – 2009. – № 3. – P. 126-131.

RESUME

V. Marceniuk, R. Sarabun

Software Environment for Modeling the Level of Blood Pressure

The purpose of the article is to investigate the model of the cardiovascular system of A.C. Fowler and M.J. McGuinness which allows determining the value of time delay of the parasympathetic system and to elaborate software that implement this model in the form of Web project.

The model of A.C. Fowler and M.J. McGuinness describes the circulatory system taking into consideration the systemic circulation and neglecting pulmonary circulation. This simplification allows avoiding the additional differential equation to describe the pressure in the pulmonary vein. It is supposed that the circulatory system is closed and the volume of blood is constant, the arteries and veins are connected like vessels so that the change of the blood volume is proportional to the variation of pressure, and the capillary system depends from the pressure drop in the system. The baroreflex control system is added to this mechanical system. The model is based on a system of nonlinear differential equations with delay.

The software environment offered in this work is implemented in the form of Java Package. Package fde is used for obtaining numerical solutions of differential equations. Package graph contains classes for providing graphical visualization of solutions of equations. The package fowler contains classes with description of model of A.C. Fowler and M.J. McGuinness.

Стаття надійшла до редакції 29.08.2012.